

УДК 536.246

Автоколебательные пульсации давления в этаноле при захолаживании нагревателя*

А.А. Левин, Э.А. Таиров, В.А. Спиряев

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

E-mail: Levin@isem.sei.irk.ru

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию процесса интенсивного охлаждения высокотемпературного металлического нагревателя движущимся потоком недогретого до температуры насыщения этанола. В проведенных опытах зафиксированы возникающие автоколебательные пульсации давления в этаноле с амплитудой 1,15 МПа. Анализ результатов скоростной видеосъемки и характеристических функций, полученных при разложении сигналов с датчиков методом Гильберта–Хуанга, позволил выделить основные частоты и механизмы формирования колебаний давления. Сравнение полученных результатов с данными чисто пленочного охлаждения и пузырькового кипения на остывающем нагревателе показало, что максимальные значения нестационарных коэффициентов теплоотдачи в случае автоколебательных пульсаций и в случае пузырькового кипения совпадают.

Ключевые слова: кипение недогретой жидкости, пульсации давления, кризис теплообмена, нестационарный теплообмен.

Введение

Изучение неравновесных процессов теплового и гидродинамического взаимодействия разогревающихся или разогретых до высокой температуры поверхностей с охлаждающими их жидкостями при фазовых превращениях представляет интерес для многих технических приложений. В первую очередь он обусловлен необходимостью обеспечения устойчивой к возможным возмущениям и безопасной работы теплообменных устройств различного назначения в энергетической, криогенной и микроэлектронной технике, характеризующейся высокими удельными тепловыми нагрузками. Особую опасность в них представляет возникновение кризисов теплоотдачи вследствие изменения внешних условий, в частности, сопровождаемых быстрым нарастанием температуры охлаждаемой поверхности. С учетом многообразия гидродинамических, тепловых геометрических и теплофизических параметров, а также начальных и граничных условий сохраняется актуальность экспериментальных методов исследования внутренних механизмов переноса теплоты между перегретой твердой поверхностью и недогретой жидкостью в нестационарных условиях. В ряде работ для этих целей использовались гладкие тонкопроволочные и пленочные нагреватели. В работах [1, 2] осуществлялся нестационарный нагрев в воде платиновой проволочки диаметром 10 мкм, длиной 1 мм и

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-01-01425).

микронагревателя размером 110×100 мкм. Тонкопроволочный нагреватель использовался также в работах [3–5] при исследовании нестационарного кризиса теплоотдачи в криогенных жидкостях и в воде. Особенностью исследования [5] явилось использование чередующихся импульсов тепловыделения различной скважности. Была выявлена зависимость числа активных центров парообразования от величины интервала между соседними импульсами; показано влияние присутствия начального тепловыделения и величины интервала между импульсами на уровень критического теплового потока. Возрастание критического теплового потока при тепловыделении в форме чередующихся импульсов было отмечено в работе [6] при изучении кипения в стекающих пленках жидкости. В продолжение изучения нестационарного кризиса теплоотдачи в стекающих пленках недогретой жидкости в работах [7–8] проводились исследования с применением термографии и скоростной видеосъемки динамики разрушения водяной пленки при импульсном возрастании тепловыделения в стенке. В исследованиях [9, 10] авторы применили импульсный лучевой подвод тепла к стенкам — мишеням, охлаждаемым в первом случае в кювете с водой, а во втором — вынужденным потоком холодной воды. Результаты экспериментов с более крупными нагревателями представлены в работах [11, 12]. В работе [11] импульсному нагреву подвергались трубки из нержавеющей стали диаметрами 3 и 12 мм, длинами 50 и 120 мм, помещенными в объем фреона и проточный канал с потоками этанола и воды. Динамика зарождения и дальнейшей эволюции паровой фазы во всех случаях исследовалась с применением скоростных видеокамер. Опыты [12] по набросам мощности в кольцевом канале общей высотой 1580 мм и длиной 300 мм тепловыделяющей части центрального стержня выявили зарождение высокоамплитудных пульсаций давления в сильно недогретой воде на стадии захолаживания горячей стенки после прекращения действия теплового импульса. Более полный перечень работ этого направления представлен в работе [11]. Динамика тепловых и гидродинамических процессов при взаимодействии предварительно разогретого полусферического металлического образца диаметром несколько миллиметров с недогретой водой представлена в работе [13]. Было обнаружено, что сход паровой пленки с поверхности, разогретой выше температуры смачивания, может сопровождаться значительным импульсом давления. Отмечалось возникновение смены режимов кипения в результате образования стоячих волн на межфазной поверхности. Авторы работы [14] представили результаты исследования пленочного кипения на тонких проволочках, в котором обратили внимание на переходную область автоколебательной смены режимов теплоотдачи. Режим высокоинтенсивного теплосъема с поверхности тонкопроволочного нагревателя без видимого образования паровой фазы описан в работе [15], где нагрев осуществлялся подачей импульсной мощности с периодом около 100 мкс и скважностью около 0,1. В работе [16] были выявлены особенности генерации автоколебаний при кипении недогретых жидкостей в трубах. Авторы выделили два типа акустических автоколебаний, разделяя их по типу на гидродинамический — с образованием пузырьков пара в фазе разрежения — и термоакустический, в случае которого процесс сжатия жидкости усиливается за счет конденсации паровых пузырьков. Отмечалась малая изученность автоколебательных процессов, протекающих при кипении жидкости в узких кольцевых каналах в условиях наступления кризиса теплоотдачи. В работе [17] авторы указали на совпадение частот пульсаций центров парообразования с частотой пульсаций парожидкостной среды как на необходимое условие для возникновения резонансных термоакустических автоколебаний, создающих стоячие волны большой амплитуды. Большое внимание автоколебательным процессам в двухфазных потоках уделено в обзоре [18]. В настоящей работе изучается автоколебательный режим пульсаций давления и перестройки структуры двухфазного потока при захолаживании вертикального трубчатого нагревателя в кольцевом канале с недогретой жидкостью (этанолом).

1. Экспериментальная установка

Опыты по набросу мощности выполнялись на малом циркуляционном контуре, содержащем проточный рабочий участок с центральной тепловыделяющей трубкой из нержавеющей стали X18H10T (длиной 120 мм, диаметром 12 мм, с толщиной стенки 1 мм), оснащенной оптически прозрачными окнами и датчиками измерения температуры, давления и расхода, интегрированными в состав системы автоматизации установки «Высокотемпературный контур». Тепловыделение на нагревателе осуществлялось вследствие пропускания через трубку управляемого трехфазного выпрямленного электрического тока длительностью импульсов от 60 до 300 мс с темпом разогрева стенки $600 \div 2000$ К/с. Начальное давление в канале p_0 составляло $0,3 \div 1,0$ МПа. Величина недогрева жидкости до температуры насыщения варьировалась в экспериментах от 10 до 135 К. Начальная скорость этанола изменялась в диапазоне от 0 до $1,1$ м/с. Визуализация процесса осуществлялась цифровой системой VS-FAST при скорости съемки 2000 кадров/с. Измерения динамики давления производились при помощи индуктивных датчиков давления ДД-10, размещенных в нижнем и верхнем сечениях тепловыделяющего канала. В работе [19] было замечено влияние температурных эффектов при соприкосновении мембраны датчика с горячим паровым образованием, порождающих ложный сигнал. В рассматриваемом в настоящей работе случае воздействие температурных импульсов на датчик давления было конструктивно исключено. Сигналы от датчиков, опрашиваемых с частотой 10 кГц, поступали на быстродействующий АЦП L-761, сопряженный с промышленной ЭВМ. Измерения температур потока и стенки нагревательного элемента выполнялись погружными хромель-копелевыми термопарами и прикрепленными к внутренней поверхности стенки хромель-алюминиевыми термопарами.

2. Обработка экспериментальных данных

Для исследования динамики давления применен современный метод анализа и обработки временных рядов, использующий преобразование Гильберта–Хуанга (ПГХ), представляющее собой инструмент для частотно-временного анализа данных (сигналов). Общая схема работы классического ПГХ, предложенного Хуангом в работе [20], состоит в разложении заданного сигнала $x(t)$ на модальные базисные функции, называемые характеристическими функциями (ХФ), с последующим применением к ним преобразования Гильберта. Процедура декомпозиции $x(t)$, предусматривающая разложение на эмпирические моды (РЭМ), представляет собой итеративный процесс, детали которого изложены в работах [20, 21]. Отметим только, что каждая полученная ХФ должна удовлетворять двум следующим свойствам:

- число экстремумов и число пересечений ХФ с осью абсцисс на заданном интервале должно совпадать;
- для любой точки ХФ среднее значение, определяемое верхней и нижней огибающими, должно быть близко к нулю.

После выполнения РЭМ последняя ХФ, как правило, представляет собой тренд исходного сигнала и называется остатком разложения.

Таким образом, исходный временной ряд может быть представлен в следующем виде:

$$x(t) = \sum_{j=1}^N c_j(t) + r(t) = l \sum_{l=1}^p c_l + \sum_{k=p+1}^q c_k(t) + \sum_{m=q+1}^N c_m(t) + r(t),$$

где c_l — ХФ, содержащие высокочастотный шум, c_k — ХФ, отражающие физические свойства ряда, c_m — ХФ, включающие низкочастотные и трендовые составляющие, N — количество ХФ, исключая остаток $r(t)$.

После работы алгоритма РЭМ к полученным ХФ применяется преобразование Гильберта. Преобразование Гильберта позволяет разложить исходный процесс $x(t)$ на две составляющие — амплитудную и частотную. Однако теперь, в отличие от стандартного преобразования Фурье, обе характеристики сигнала зависят от времени и называются «мгновенная амплитуда» и «мгновенная частота». Подробности получения мгновенных амплитуд и частот для ХФ можно найти в работах [20, 21].

После нахождения мгновенных амплитуд и частот исходный сигнал можно записать в виде:

$$x(t) = \text{Real} \left(\sum_{j=1}^N a_j(t) e^{i \int_0^t w_j(s) ds} \right),$$

где Real — действительная часть сигнала, $a_j(t)$ и $w_j(t)$ мгновенные амплитуды и частоты, соответствующие j -ой ХФ, N — как и ранее, количество ХФ без остатка.

Отметим, что за последнее десятилетие применения ПГХ был предложен целый спектр различных модификаций метода, в основном направленных на улучшение работы метода РЭМ. Одна из таких модификаций [22], основанная на применении адаптивного белого шума, позволяет получить более точные и физически обоснованные декомпозиции на ХФ для исходного сигнала. Эта модификация и была использована в работе.

Анализ динамики структуры парожидкостного слоя и пульсаций давления дополнен определением нестационарного коэффициента теплоотдачи из баланса тепловой мощности: $a = \frac{C_m}{F(T_w - T_1)} \cdot \frac{dT_w}{d\tau}$, где C_m — теплоемкость нагревателя, кДж/К, F — площадь поверхности нагревателя, м², T_w — температура нагревателя, К, T_1 — температура ядра жидкости, К.

3. Пульсации давления в автоколебательном режиме захлаживания

Межфазные превращения, протекающие в условиях захлаживания перегретой выше температуры насыщения поверхности, зачастую сопровождаются возникновением импульсов давления различной интенсивности. Их амплитуда, частота и продолжительность зависят от многих факторов, основными из которых являются геометрические размеры охлаждаемой поверхности, занимаемый охладителем объем, а также температуры поверхности и охладителя. Так, при перегреве поверхности нагревателя выше температуры смачиваемости, на ней образуется паровая оболочка, препятствующая быстрому охлаждению металла. Возникновение в этом случае существенных импульсов давления объясняется тем, что в достаточно краткие промежутки времени паровая оболочка расширяется за счет испарения перегретой жидкости, а затем сжимается в процессе конденсации. Обычно этот угасающий пульсационный процесс протекает в кратком промежутке времени (100–300 мс), затем паровая оболочка переходит в режим стационарного пленочного кипения или, при достижении условий смачивания, в режим пузырькового кипения на остывающей поверхности.

В настоящей работе обращено внимание на режим захлаживания, характеризующийся узким диапазоном максимальной температуры нагревателя выше точки смачивания в пределах пленочного типа кипения. Для достижения необходимой температуры перегрева нагревателя выше температуры насыщения (~110 К) к нему подводился управляемый трехфазный выпрямленный ток заданной длительности. Возникновение автоколебательного режима пульсаций происходило в следующих режимных условиях: начальное давление $p_0 = 0,3$ МПа, скорость потока этанола $w = 0 \div 1$ м/с. Варьирование начальной температуры жидкости показало, что реализация этого режима протекает в узком диапазоне значений $\Delta T_{\text{sub}} = 84 \div 85$ К. Схожие по масштабу ограничения на условия реализации автоколебательного режима были отмечены в работе [14]. При этом температура нагревателя в ходе процесса захлаживания может изменяться в широких пределах.

На рис. 1 представлена динамика давления в процессах импульсного тепловыделения продолжительностью $\tau_m = 280$ (рис. 1а) и 260 мс (рис. 1б) и последующего захлаживания нагревателя, окруженного потоком недогретого до температуры насыщения этанола. В условиях более высокого перегрева нагревателя выше температуры смачивания $T_{\max} = 250$ °С (рис. 1а) после первичных импульсов, вызванных взрывным вскипанием этанола на стенке, образуется паровая пленка. Частота пульсаций давлений (рис. 1а) составляет около 35 Гц и определяется исходными температурами жидкости и нагревателя (ΔT_{sub} и T_{\max}). После нескольких колебаний пленка приходит в устойчивое состояние, и дальнейшее охлаждение стенки с последующим ее смачиванием протекает в беспульсационном режиме.

В случае более короткого тепловыделения и, соответственно, меньшего конечного перегрева стенки ($T_{\max} = 235$ °С) пленочное охлаждение становится сильно неустойчивым. При этом возникают автоколебательные пульсации давления частотой 47÷53 Гц с нарастающей амплитудой (рис. 1б). Размах давления в импульсе достигает 1,15 МПа, создавая четырехкратное превышение максимального давления над начальным давлением в жидкости. Длительность нарастания амплитуды составила 600 мс, затем в течении 400 мс

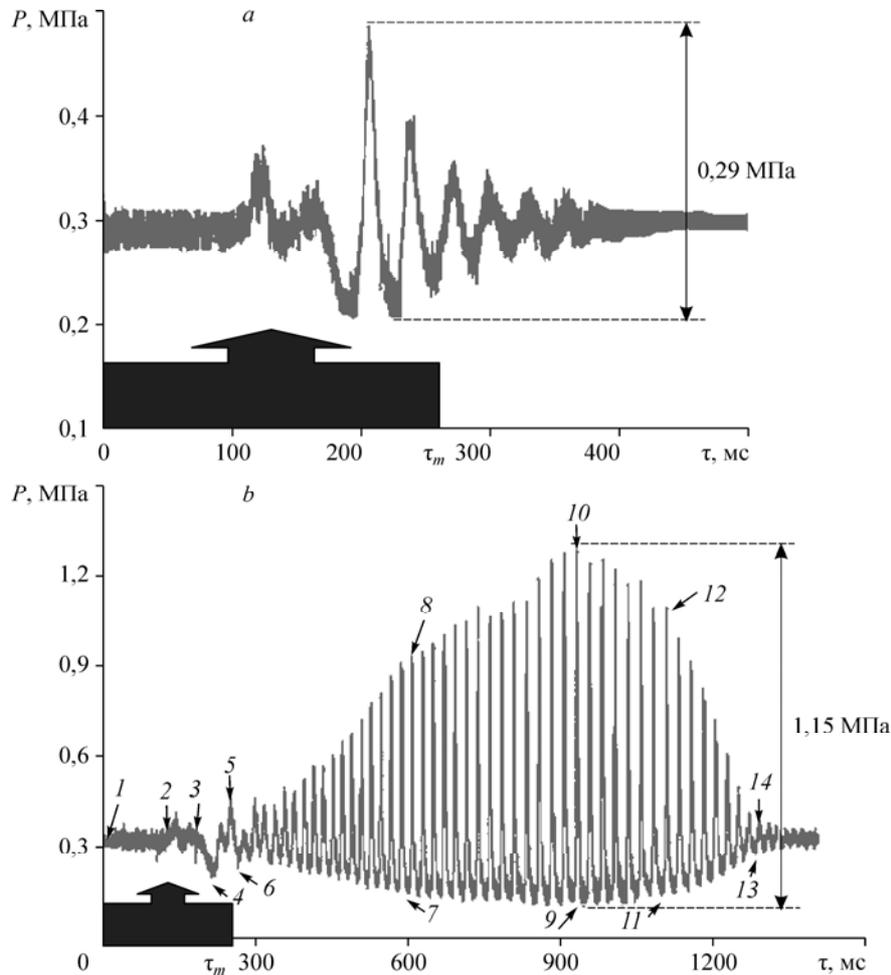


Рис. 1. Динамика давления в этаноле в условиях импульсного тепловыделения с различной продолжительностью импульса.

Условия эксперимента: $\Delta T_{\text{sub}} = 86$ К, $dT_w/d\tau = 830$ К/с, $p_0 = 0,3$ МПа, $w_0 = 0,4$ м/с; $\tau_m = 280$ (а), 260 (б) мс.

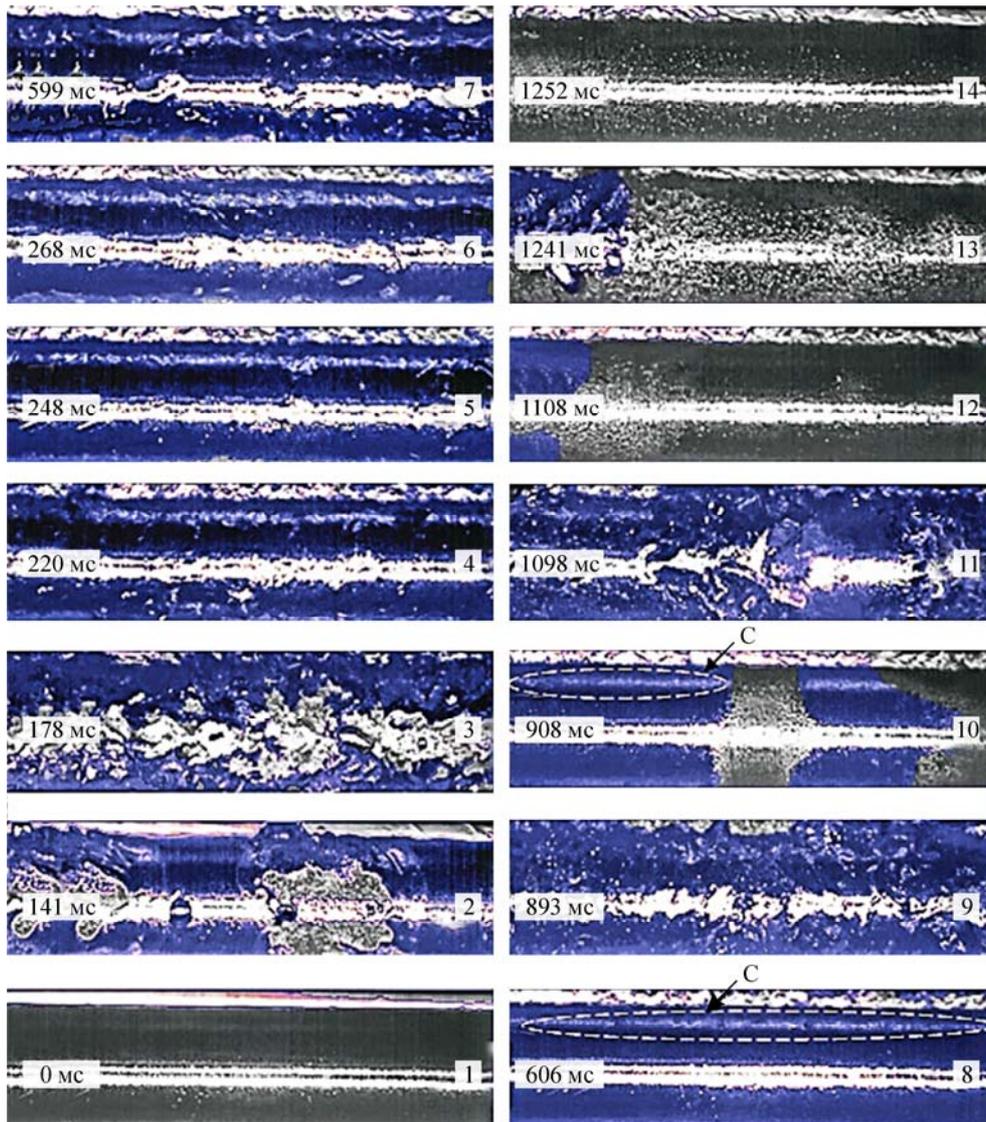


Рис. 2. Видеogramма вскипания недогретого этанола на трубчатой поверхности в условиях вынужденного движения.

Условия экспериментов: $p_0 = 0,3$ МПа, $\Delta T_{\text{sub}} = 86$ К, $w_0 = 0,4$ м/с, $dT_w/d = 830$ К/с; длительность импульса тепловыделения $\tau_m = 260$ мс; времена указаны от момента начала тепловыделения; С — отраженный свет; паровая пленка на поверхности нагревателя выделена цветом.

наблюдается угасание пульсаций. Данные скоростной видеосъемки, представленные на рис. 2 (кадры 5–12), обнаруживают циклические изменения паровой оболочки в форме «развитие-подавление» парообразования на стенке во время автоколебательных пульсаций давления. Анализ видеокadres также показал наличие стоячих волн давления с характерной скоростью 9 м/с в канале длиной 35 см, что соответствует частоте около 51 Гц. Можно предположить, что механизм возникновения автоколебательного процесса состоит в совпадении частоты межфазных переходов вблизи перегретой поверхности с частотой стоячей волны давления в парожидкостной смеси. Возникающее при этом усиление амплитуды давления благодаря существенному уменьшению толщины паровой пленки создает условия для роста промежутков времени интенсивного теплосъема с остывающего нагревателя. В результате циклической подкачки колебательного процесса,

которая осуществляется за счет убывания тепловой энергии нагревателя, амплитуда пульсаций давления возрастает до некоторого предела. По мере нестационарного захлаживания стенки интенсивность циклических взрывных вскипаний снижается, и амплитуда колебаний начинает уменьшаться до их исчезновения в режиме полного смачивания теплоотдающей стенки. При отсутствии реализации механизма автоколебаний кипение протекает в пленочном режиме.

На видеокadre 10 (рис. 2) в нижней и средней частях нагревателя заметны области «псевдосмачивания» с явной интенсивной локальной генерацией пара, похожей на взрывное вскипание жидкости на перегретой поверхности. Видимая с правой стороны светлая полоса отраженного освещения от межфазной границы «пар–жидкость» свидетельствует о наличии паровой оболочки вокруг нагревателя. В условиях достижения эффекта Лейденфроста говорить о действительном соприкосновении массы жидкости с металлом не приходится, однако в работе [13] авторы указывают на возможность реализации нестационарной смачиваемости в условиях касания горячей поверхности гребнями стоячих волн на межфазной границе. На видеокadre 13, 14 можно видеть исчезновение паровой оболочки. Дальнейшее понижение температуры нагревателя сопровождается устойчивым смачиванием стенки и угасанием пульсаций давления (рис. 1*b*). На рис. 3, 4 представлены графики частот этих пульсаций, полученные с помощью преобразования Гильберта–Хуанга из соответствующих им характеристических функций для начальной стадии приведенного на рис. 1*b* автоколебательного процесса в промежутках времени между 360 мс и 450 мс и развитой стадии колебаний в промежутке между 800 и 920 мс. Применительно к начальной стадии выделены основные несущие частоты: 51 Гц — частота процесса, связанного с общим расширением и сжатием паровой оболочки вокруг нагревателя в результате интегральных фазовых переходов, и 800 Гц — частота пульсаций, возникающих в результате локальных межфазных переходов в ходе уменьшения или увеличения давления в канале. Примеры механизмов реализаций подобных автоколебаний рассмотрены в работе [16]. Сравнение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) исследуемых пульсаций с АЧХ, представленными в работе [16], позволяет предположить возможность реализации как термоакустического, так и гидродинамического механизмов возбуждения автоколебаний.

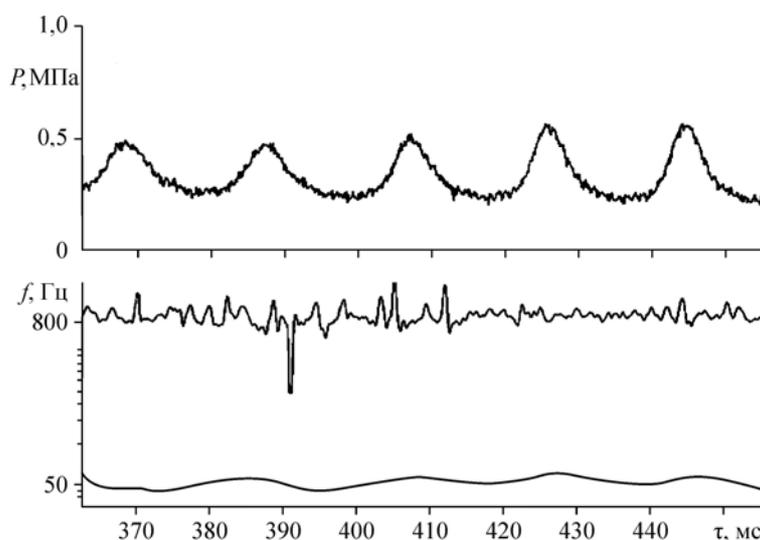


Рис. 3. Зависимость давления и частот ХФ от времени для сигнала датчика давления, разложенного преобразованием Гильберта–Хуанга, в начальной стадии развития автоколебательных пульсаций.

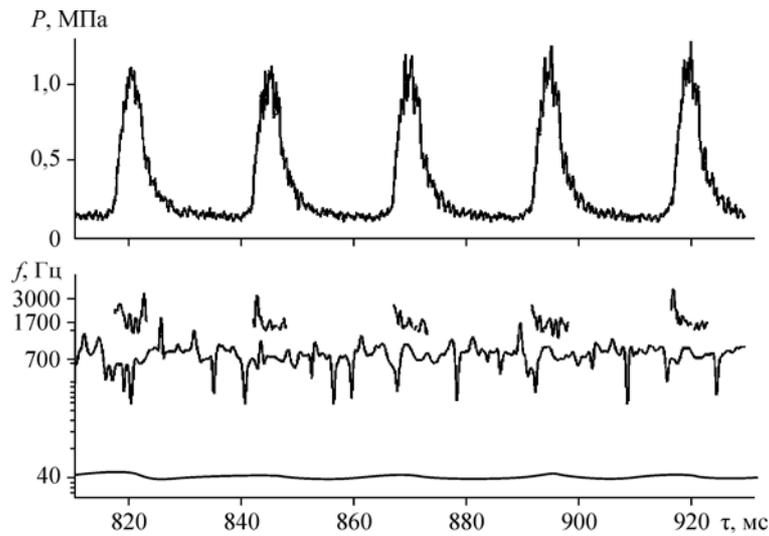


Рис. 4. Зависимость давления и частот ХФ от времени для сигнала датчика давления, разложенного преобразованием Гильберта–Хуанга, на стадии образования областей «псевдосмачивания».

С усилением амплитуды пульсационного процесса в спектре появляется высоко-частотная составляющая (около 2000 Гц) колебаний давления (рис. 4). При этом проявление этой составляющей совпадает с моментами достижения максимумов давления. В эти моменты толщина пристенной паровой пленки из-за физической сжимаемости пара и частичной его конденсации уменьшается настолько, что проявляется особый вид динамического взаимодействия в форме «псевдосмачивания» на отдельных участках окружающей жидкости с горячей стенкой. При таком взаимодействии происходит взрывное испарение, в первую очередь с гребней волновой поверхности, характеризующееся интенсивным теплосъемом от высокотемпературной стенки и создающее динамическое воздействие с образованием мелкоструктурной ряби на межфазной границе. Наблюдается уменьшение значений среднечастотной и низкочастотной составляющих спектра пульсационного процесса до 700 и 47 Гц соответственно из-за вовлечения больших объемов паровой массы в колебательные процессы.

Для подробного рассмотрения протекающих процессов были сопоставлены видеокadres и динамика давления в масштабах одного высокоамплитудного импульса давления (рис. 5). Первичные импульсы давления генерируются в результате взрывного вскипания перегретых слоев жидкости (кадры 1–7), окружающих тонкую паровую пленку на поверхности нагревателя. С ростом давления уменьшается объем парового слоя вокруг нагревателя и увеличивается площадь контакта межфазной поверхности (кадры 1–5). В местах контакта происходит интенсивное парообразование, оттесняющее окружающую жидкость от высокотемпературной стенки. Количество образующегося при этом пара ограничено длительностью локального контакта жидкости со стенкой. Расширение парового слоя после прекращения интенсивной генерации дополнительного количества пара сопровождается падением давления. Кривая снижения давления оказывается более затянутой по времени из-за дополнительной генерации пара за счет самоиспарения становящейся перегретой доли жидкости (кадры 10–15). С падением давления межфазная поверхность приобретает большую рельефность, паровой объем увеличивается, а площадь области «псевдосмачивания» уменьшается.

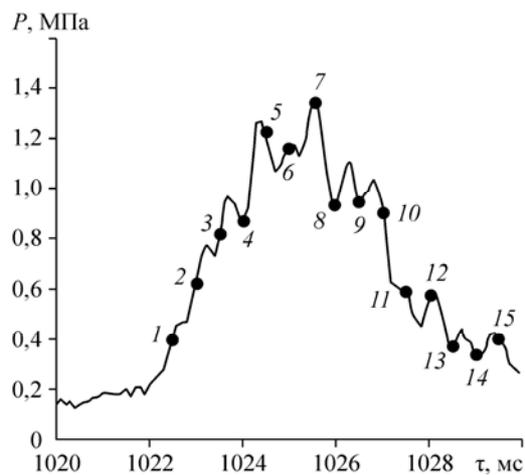
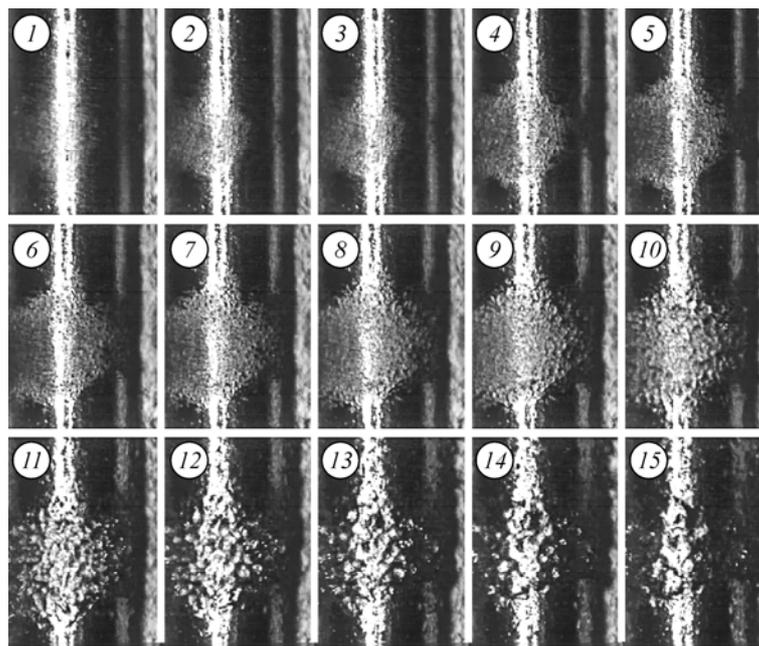


Рис. 5. Видеogramма и динамика давления в масштабе одного импульса автоколебательного процесса.

Моменты 1–15 на видеокадрах соответствуют моментам времени на графике.

На рис. 6 приведены полученные экспериментальные данные по динамике температуры нагревателя (рис. 6а) и рассчитанные коэффициенты теплоотдачи (рис. 6б) устойчивого пузырькового (3), пленочного (1) и рассматриваемого в настоящей работе автоколебательного (2) режимов кипения на поверхности охлаждаемого нагревателя. Возникающая в последних двух случаях пленка пара приводит к существенному снижению теплосъема в начале захлаживания, но для кривой 2 резкое снижение температуры поверхности начинается уже при 700 мс, совпадая по времени с образованием зон «псевдосмачивания». При этом температура нагревателя в момент начала интенсивного захлаживания превышает на 10 К аналогичную температуру в условиях чистого пленочного кипения. Оценка динамики коэффициента теплоотдачи (кривые 1 и 2) выявляет существенное различие в процессах захлаживания: рассчитанные значения коэффициента

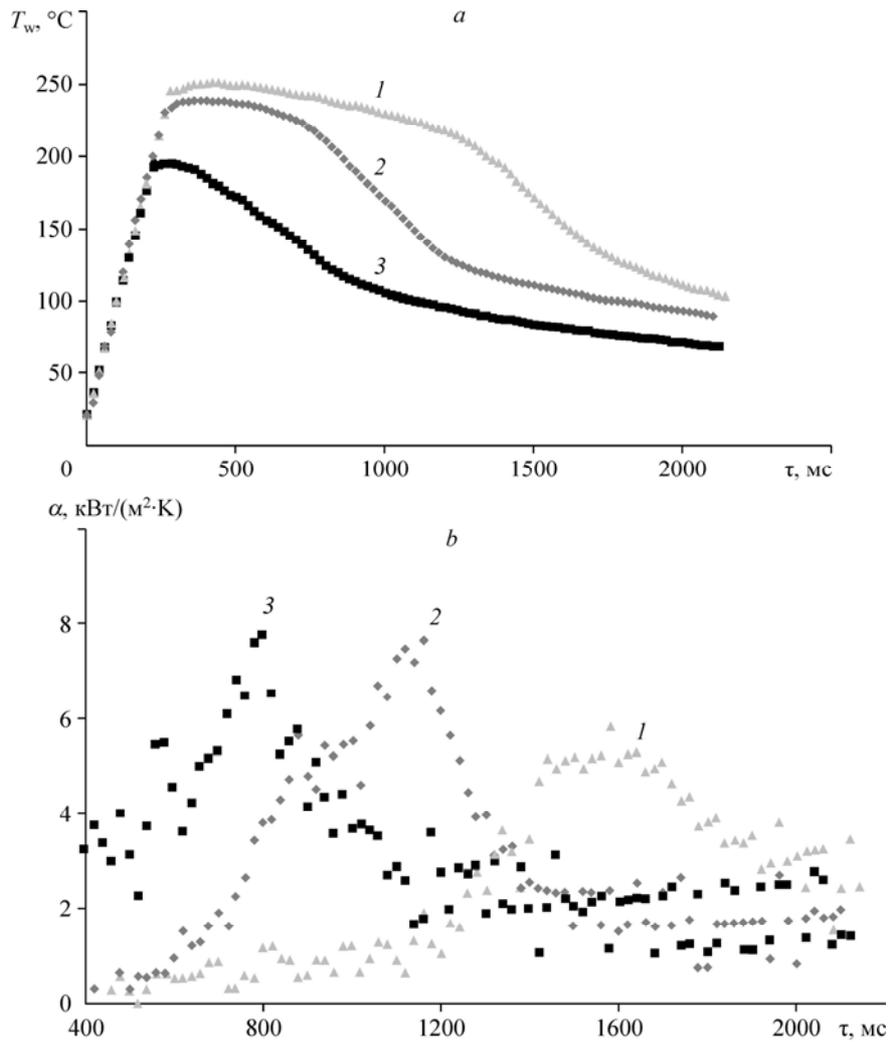


Рис. 6. Динамика температуры нагревателя (а) и коэффициента теплоотдачи (b) при набросе тепловой мощности в условиях вынужденного движения.
 Условия экспериментов: $\Delta T_{\text{sub}} = 86 \text{ K}$, $dT_w/d\tau = 830 \text{ K/s}$, $p_0 = 0,3 \text{ МПа}$, $w_0 = 0,4 \text{ м/с}$;
 длительность импульса тепловыделения $\tau_m = 280$ (1), 260 (2), 200 (3) мс.

теплоотдачи для автоколебательного режима (кривая 2 на рис. 6b) стремятся к максимуму $\alpha = 8 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$, соответствующему уровню интенсивности теплосъема в пузырьковом режиме (кривая 3, рис. 6b). Эти данные удовлетворительно согласуются с результатами расчетов по формуле Лабунцова ($\alpha = 6,3 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$) для пузырькового кипения [23].

Описанный механизм интенсивного теплообмена согласуется с представленным в работе [24], где также указывается на существование особого механизма интенсивного охлаждения высокотемпературной поверхности в недогретой воде, отличного от известных видов кипения (пузырькового, переходного и пленочного). Отмечается роль неустойчивости паровой пленки и установленная опытным путем в работе [25] возможность прямых контактов элементов шероховатостей стенки и жидкости (воды) при температурах подложки выше $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование автоколебательного режима захлаживания трубчатого нагревателя в условиях вынужденного движения этанола. Выявлено существование условий охлаждения нагревателя, при котором пульсация пленки пара на поверхности нагревателя сочетается с кратковременным существованием областей сверхинтенсивного вскипания перегретой жидкости, обладающих высоким уровнем теплосъема. Определены мгновенные значения характерных частот нестационарного процесса и значения коэффициентов теплоотдачи для режимов с пузырьковым и пленочным кипением для этих условий. Отмечено высокое значение нестационарного коэффициента теплоотдачи для пульсирующей пленки пара.

Список литературы

1. Glod S., Poulidakos D., Zhao Z., Yadigarogly G. An investigation of microscale explosive vaporization of water on an ultrathin Pt wire // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2002. Vol. 45. P. 367–379.
2. Zhao Z., Glod S., Poulidakos D. Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater // *Int. J. of Heat Mass Transfer*. 2000. Vol. 43. P. 281–296.
3. Deev V.I., Kharitonov V.S., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A. Transient boiling crisis of cryogenic liquids // *Int. J. of Heat Mass Transfer*. 2004. Vol. 47. P. 5477–5482.
4. Deev V.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Kharitonov V.S. Influence of initial heat generation on dynamic characteristics of transient boiling crisis of water // *Int. J. of Heat Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. P. 1851–1855.
5. Pavlenko A.N., Chekhovich V.Yu. Interconnection between dynamics of liquid boiling-up and heat transfer crisis for nonstationary heat release // *J. of Engineering Thermophysics*. 2007. Vol. 16, № 3. P. 175–187.
6. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V., Surtaev A.S. Dynamics of transition processes and structure formation in critical heat–mass transfer regimes during liquid boiling and cavitation // *J. of Engng Thermophysics*. 2009. Vol. 18, No. 1. P. 20–38.
7. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Busov K.A., Skokov V.N. Disintegration of flows of superheated liquid films and jets // *J. of Engineering Thermophysics*. 2013. Vol. 22, No. 3. P. 174–193.
8. Surtaev A.S., Pavlenko A.N. Observation of boiling heat transfer and crisis phenomena in falling water film at transient heating // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 74, No. 7. P. 342–352.
9. Антонова Л.И., Афанасьева Е.Ю., Дробязко С.В. и др. Моделирование теплоотдачи от оболочки твэла в условиях быстрого энерговыклада // *Атомная энергия*. 2002. Т. 92, вып. 2, С. 103–109.
10. Стаханова А.А., Варва А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т. Исследование теплообмена при импульсном нагреве модельных фрагментов оболочек твэлов // *Теплоэнергетика*. 2011. № 7. С. 65–72.
11. Pavlenko A.N., Taïrov E.A., Zhukov V.E., Levin A.A., Moiseev M.I. Dynamics of transient processes at liquid boiling-up in the conditions of free convection and forced flow in a channel under nonstationary heat release // *J. of Engineering Thermophysics*. 2014. Vol. 23, No. 3. P. 173–193.
12. Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Таиров Э.А., Чижиков С.А. Моделирование ударных процессов при аварийном набросе мощности в сборке твэлов // *Теплоэнергетика*. 1999. № 3. С. 53–62.
13. Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А. Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // *Теплофизика высоких температур*. 2005. Т. 43, № 1. С. 100–114.
14. Жуков С.А., Афанасьев С.Ю., Ечмаев С.Б. Особенности реализации пленочного кипения на проволочных нагревателях. Дистиллированная вода // *Теплофизика высоких температур*. 2003. Т. 41, № 4. С. 568–578.
15. Ечмаев С.Б., Жуков С.А. Исследование устойчивости метастабильных состояний в условиях повторяющихся импульсных тепловых нагрузок // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51, № 6, С. 958–960.
16. Дорофеев Б.М., Волкова В.И. Гидродинамические и термоакустические автоколебания при поверхностном кипении в каналах // *Акустический журнал*. 2008. Т. 54, № 5. С. 732–739.
17. Smirnov H.F., Zrodnikov V.V., Boshkova I.L. Thermoacoustic phenomena at boiling subcooled liquid in channels // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1997. Vol. 40, No. 8. P. 1977–1983.
18. Ruspini L.C., Marcel C.P., Clausse A. Two-phase flow instabilities: A review // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2014. Vol. 71. P. 521–548.
19. Ивочкин Ю.П., Зейгарник Ю.А., Вавилов С.Н., Ковалев С.А. Оценка влияния температурных импульсов на показания пьезоэлектрических датчиков давления // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51, № 5. С. 764–768.
20. Huang N.E., Zheng Shen, Steven R. Long, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis // *Proc. Royal Soc. London. Ser. A: Math., Phys. and Engineer. Sci.* 1998. Vol. 454, No. 1971. P. 903–995.

21. **Flandrin P., Rilling G., Goncalves P.** On empirical mode decomposition and its algorithms // IEEE Signal Proc. Lett. 2004. Vol. 11, No. 2. P. 112–114.
22. **Torres M.E., Colominas M.A., Schlotthauer G., Flandrin P.** A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise // IEEE Int. Conf. on Acoust., Speech and Signal Proc. ICASSP-11. Prague (CZ). 2011. P. 4144–4147.
23. **Лабунцов Д.А.** Обобщение зависимости для теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1960. № 5. С. 76–81.
24. **Ягов В.В., Забиров А.Р., Лексин М.А.** Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 70–80.
25. **Bradfield W.S.** Solid-liquid contact in stable film boiling // Ind. Eng. Chem. Fundam. 1966. № 5. P. 200–204.

*Статья поступила в редакцию 16 ноября 2015 г.,
после доработки — 2 марта 2016 г.*